



⑮ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Übersetzung der
europäischen Patentschrift

⑨ EP 0 602 983 B 1

⑩ DE 693 28 818 T 2

⑤ Int. Cl.⁷: **B6**
H 01 J 43/28
G 01 N 23/227
G 01 T 1/28

- ⑦ Deutsches Aktenzeichen: 693 28 818.3
⑧ Europäisches Aktenzeichen: 93 310 188.3
⑨ Europäischer Anmeldetag: 16. 12. 1993
⑩ Erstveröffentlichung durch das EPA: 22. 6. 1994
⑪ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: 7. 6. 2000
⑫ Veröffentlichungstag im Patentblatt: 19. 10. 2000

⑬ Unionspriorität:

992430	17. 12. 1992	US
91764	14. 07. 1993	US

⑭ Patentinhaber:

Intevac, Inc., Santa Clara, Calif., US

⑮ Vertreter:

Patentanwälte Dr. Solf & Zapf, 81543 München

⑯ Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT, NL, SE

⑰ Erfinder:

La Rue, Ross Actor, Milpitas CA 94587, US; Costello,
Kenneth, Union City CA 94587, US; Aebi, Verle W.,
Menlo Park CA 94025, US

⑱ Hybrid-Photovervielfacherröhre mit hoher Empfindlichkeit

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 693 28 818 T 2

BEST AVAILABLE COPY

0602 983

07.08.00

M 5111 EP/M/hn

Diese Erfindung betrifft eine Photovervielfacherröhre in Übereinstimmung mit dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Herkömmliche Photovervielfacherröhren umfassen eine Vakuumhülle, die eine Photokathode, mehrere Dynoden und einen Elektronenkollektor enthält. Das durch ein Fenster in die Röhre eintretende und auf der Photokathode auftreffende Licht führt zur Emission von Elektronen durch die Photokathode. Die Elektronen treffen auf den nachfolgenden Dynoden auf und führen zu einer Elektronen-Vervielfachung durch Sekundäremission. Nach dem Auftreffen auf der letzten Dynode werden die Elektronen gesammelt und auf einer Ausgangsleitung der Röhre gefördert, um ein Ausgangssignal bereitzustellen, welches für das einfallende Licht repräsentativ ist.

Eine Hybrid-Photovervielfacherröhre umfaßt eine Photokathode, Elektronen-fokussierende Elektroden und eine Elektronen-bombadierte Photodiodenanode. Durch die Photokathode emittierte Elektronen werden auf die Photodiode fokussiert. Die Elektronen dringen in das Photodiodenmaterial ein und erzeugen Elektronen-Lochpaare, die eine Vervielfältigungswirkung erzeugen. Die Verstärkung wird eher durch die Photodiode als durch die Dynoden bereitgestellt, wie bei der herkömmlichen Photovervielfacherröhre.

Ein Hybrid-Photovervielfacher ist durch L.K. van Geest et al. in "Hybrid Phototube With Si Target", SPIE, Band 1449, Electron Image Tubes and Image Intensifiers II, 1991, S. 121-134, offenbart. Eine Photovervielfacherröhre unter Verwendung von

BEST AVAILABLE COPY

07.08.00

sowohl Dynoden wie einer Stoßionisationsdiode zur Elektronenvervielfachung ist im US-Patent Nr. 3 885 178, am 20. Mai 1975, auf Goehner erteilt, offenbart.

Eine Vorspannung in der Größenordnung von 10 kV wird typischerweise zwischen der Anode und Kathode einer Hybrid-Photovervielfacherröhre angelegt. Die Elektronen werden durch das angelegte ~~Feld~~-beschleunigt und bombardieren die Photodiodenanode, was zu einer Vervielfältigungsverstärkung führt. Abhängig von dem Photodiodenmaterial werden 20 bis 30% der Elektronen mit unterschiedlichen Winkeln von der Diodenoberfläche zurückgestreut. Einige der Elektronen schlagen auf der Innenseite dieser Röhrenwand auf und verursachen ein Aufladen der Röhrenwand. Die Ladungen modifizieren das Potential in der Röhre und verursachen ein Defokussieren des Elektronenstrahls sowie eine Betriebsinstabilität. Für eine ausreichend große Beschleunigungsspannung können Röntgenstrahlen auf der Diodenoberfläche aufgrund der Elektronenverzögerung erzeugt werden. Die Röntgenstrahlen schlagen auf der Innenseite der Röhrenwand auf, was zu einer Ionisation oder einem positiven Aufladen der Oberfläche führt. Erneut ist das Nettoergebnis ein Elektronendefokussieren und eine Betriebsinstabilität. Ein Elektronenvervielfacher mit gekrümmtem Kanal, bei welchem ein Teil der Außenseite mit einer Silberdünnschicht beschichtet ist, um den Effekt der verteilten Kapazität auf verschiedene Parameter festzustellen, ist offenbart durch K.C. Schmidt et al. in "Continuous Channel Electron Multiplier Operated in the Pulse Saturated Mode", IEEE Trans. Nucl. Sci., Juni 1966, S. 100-111.

Ein Ansatz gemäß dem Stand der Technik in bezug auf das Wandaufladungsproblem in Photovervielfacherröhren sieht eine

07.05.00

teilsweise (elektrisch) leitende Beschichtung, wie etwa in Form von grünem oder schwarzem Chromoxid, auf der Innenseite der Rohrwand auf. Die Beschichtung muß jedoch hochgradig beständig sein, um einen Kurzschluß der Röhrenelektroden zu verhindern. Die Beschichtung ist besonders wirksam beim Verrin- gern des Effekts der Wandaufladung. Die Röhrenlebensdauer kann verringert sein durch Ausgasen aus diesen Beschichtungen in die Vakuumhülle.

Die US-A-3 345 537 offenbart eine Elektrode auf der Außenseite der Röhre sich kontinuierlich entlang den Flugbahnen der Elek- tronon erstreckend. Die vorliegende Erfindung verbessert diese Anordnung in Übereinstimmung mit dem kennzeichnenden Teil des Anspruchs 1. Die Unteransprüche betreffen bestimmte Ausfüh- rungsformen der Erfindung. Die EP-A-0 360 906 und die Druck- schrift Physique appliquée aux Industries du Vide et de l'E- lectronique, S. 288-9, GA Boutry, Paris 1971, offenbaren beide isolierende Leiter, angeordnet entlang den Flugbahnen der ge- ladenen Partikel; diese Elektroden sind jedoch auf der Innen- seite der Vakuumhülle angeordnet. Diese Anordnung besitzt Nachteile, wie nachfolgend näher erläutert.

In den anliegenden Zeichnungen sind die Fig. 1-4B in unserer gleichzeitig anhängigen Anmeldung 93 310 187.5 (EP-A- 0 602 982) dargestellt. Die Zeichnungen zeigen Beispiele der Erfindung; in diesen zeigen:

Fig. 1 eine Querschnittsansicht eines FEB-Ionendetektors,

Fig. 2 eine Detailansicht des Diodenelements des FEB- Ionendetektors,

- Fig. 3 schematisch den Betrieb des FEB-Ionendetektors,
- Fig. 4A eine tatsächlich gemessene Übertragungskurve des Ausgangsstroms als Funktion des Eingangsstroms für den FEB-Ionendetektor,
- Fig. 4B eine Kurve der differentiellen Verstärkung als Funktion des Eingangsstroms, berechnet aus Fig. 4A,
- Fig. 5 eine Querschnittsansicht einer Hybrid-Photovervielfacherröhre in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung,
- Fig. 6 schematisch die Photovervielfacherröhre von Fig. 5 unter Darstellung der leitenden Abschnitte der Röhre und der resultierenden Equipotentiallinien des elektrischen Felds und der Elektronenflugbahnen,
- Fig. 7 eine Kurvendarstellung der Quantenausbeute und der Empfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge für eine Galliumarsenidphosphid-Photokathode,
- Fig. 8 eine Kurvendarstellung der Quantenausbeute und der Empfindlichkeit als Funktion der Wellenlänge für eine Galliumarsenid-Photokathode, und
- Fig. 9 eine Kurvendarstellung der Elektronenbombardementverstärkung als Funktion der Photokathodenvorspannung relativ zu der Anode.

Ein FEB-Ionendetektor ist in Fig. 1 und 2 gezeigt. Eine Standardmikrokanalplatte (MCP) 2 ist an einem Ende eines zylindri-

schen Detektorkörpers 4 angebracht. Bei der in Fig. 1 gezeigten Ausführungsform besteht der Detektorkörper 4 aus einer Reihe von Keramikringen, die übereinander im Stapel angeordnet sind, um die geeigneten Abmessungen zu ergeben. Alternativ kann der Detektorkörper gebildet sein aus einem speziell konstruierten Zylinder oder in einer beliebigen anderen Form, welche durch die Anwendung diktiert ist. Die MCP 2 ist durch einen Haltering 6 an Ort und Stelle gehalten. Leiter 8 und 10 erstrecken sich ausgehend von der MCP-Eingangselektrode 7 bzw. der MCP-Ausgangselektrode 9, um den Ionendetektor an eine geeignete Energiequelle (nicht gezeigt) anzuschließen.

Zwei Elektronenfokussierringe 12 und 14 sind in dem Detektorkörper 4 angeordnet. Bei der in Fig. 1 gezeigten Ausführungsform sind die Ringe 12 und 14 zwischen Paaren von Keramikringen angebracht, die einen Detektorkörper 4 umfassen. Weitere Mittel zum Anbringen der Fokussierringe können verwendet werden, ohne von der Erfindung abzuweichen. Die Ringe 12 und 14 sind mit einer (nicht gezeigten) externen Energiequelle über geeignete Leiter 16 und 18 verbunden. Der Zweck der Fokussierringe 12 und 14 besteht darin, den Ausgang der MCP auf die Sammelanode zu konzentrieren, wie in Fig. 3 schematisch gezeigt.

Eine Sammelanode 20 ist am fernen Ende des Detektorkörpers 4 angeordnet. Die Anode 20 umfaßt einen breitbandigen Mikrowellen-(steck)-verbinder-30, einen stufenförmig-verjüngten koaxialen Übertragungsleitungsabschnitt 32 und eine Festkörperdiode 34 zum Abschließen der Übertragungsleitung. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform handelt es sich bei der Diode 34 um eine AlGaAs/GaAs-Pin-Diode, welche für die Elektronenbombardement-Stromverstärkung optimiert ist. Wie im einzelnen in Fig.

07.08.00

2 gezeigt, umfaßt die bevorzugte Ausführungsform der Diode 34 drei getrennte Schichten 40, 42 und 44, die auf einem n+-GaAs-Substrat 46 gebildet sind. Die obere Schicht 40 ist mit einer $\text{Al}_{30}\text{Ga}_{70}\text{As}$ -P-Schicht einer Dicke von ungefähr 250 Å beschichtet. Die Schicht 40 stellt eine Potentialbarriere in der Nähe der Oberfläche der Diode bereit, um die erzeugten Elektronenminoritätsträger vom Rekombinieren an der Oberfläche abzuhalten. Die Zusammensetzung der Schicht 40 ist hinsichtlich Stabilität und zugunsten ihrer Beständigkeit gegenüber Oxidation während der Verarbeitung in Luft gewählt. Die Schicht 42 ist mit GaAs vom P-Typ mit ungefähr einer Dicke von 0,25 µm beschichtet.

Die Schicht 44 besteht aus undotiertem GaAs und hat ungefähr eine Dicke von 6 µm. Die Dicke der Schicht 44 ist zum Optimieren der Ansprechzeit der Diode in Übereinstimmung mit den folgenden Prinzipien optimiert:

Die Übertragungszeit T_{transit} eines Elektrons über eine undotierte Schicht der Dicke w beträgt

$$T_{\text{transit}} = w/v_{\text{sat}}$$

wobei $v_{\text{sat}} = 1 \times 10^7$ cm/s. Die RC-Zeit-Konstante T_{RC} der belasteten Diode beträgt

$$T_{\text{RC}} = E (\pi r^2/w) R_L$$

wobei r der Radius der Diode ist und wobei R_L die Diodenlast (beispielsweise 50 Ω) ist. Das zeitliche Ansprechen der belasteten Diode ist minimiert, wenn $T_{\text{transit}} = T_{\text{RC}}$, oder wenn

$$w/v_{\text{sat}} = E (\pi r^2/w) R_L$$

Das optimale w bzw. die undotierte Dicke beträgt deshalb

$$w = \text{Quadratwurzel aus } (E \pi r^2 V_{\text{sat}} R_L)$$

Das optimale Zeitverhalten lautet daher

$$T_{\text{opt}} = \text{Quadratwurzel aus } (E \pi r^2 R_L / V_{\text{sat}})$$

Da T_{opt} proportional zum Diodenradius ist, ist das Zeitverhalten eines FEB-Detektors unter Verwendung einer derartigen Diode stark verbessert in bezug auf Detektoren, welche nicht fokussieren.

Es folgt ein Beispiel der Konstruktion und der Betriebsparameter eines FEB-Ionendetektors in Übereinstimmung mit einer bevorzugten Ausführungsform. Die MCP dieses Beispiels besitzt eine Plattendicke von 19 mm und einen Kanaldurchmesser von 10 μm . Eine externe Energiequelle legt ein Potential von ungefähr 1000 V an den Eingangs- und Ausgangselektroden 7 und 9 der MCP an. Außerdem legt die Energiequelle ein Potential von ungefähr 30 V zwischen der MCP-Ausgangselektrode 9 und dem ersten Fokussiererring 12 an und ein Potential von ungefähr 400 V zwischen der MCP-Ausgangselektrode 9 und dem zweiten Fokussiererring 14. Die Sammelelektrode 20 ist auf Masse gelegt, was zu einem Spannungsabfall zwischen der Diode 34 und dem MCP-Ausgang von ungefähr 10.000 V führt.

Im Betrieb schlagen geladene Partikel (wie beispielsweise positive Ionen) auf den MCP-Kanalwänden auf und erzeugen Elektronen. Die Elektronen werden durch die Spannung über die MCP beschleunigt und schlagen auf den Kanalwänden auf, um zusätz-

07.05.00

liche Elektronen zu erzeugen. Diese Vervielfachung der Elektronen führt zu einem Elektronenfluß am MCP-Ausgangsende mit einer Nettoverstärkung der Elektronenladung pro einfallendem geladenen Partikel. Die erzeugten Elektronen werden daraufhin durch die Fokussierringe 12 und 14 beschleunigt und fokussiert. Die Fokussierringe des FEB-Ionendetektors reduzieren den Durchmesser des MCP-Ausgangs von 18 mm an der Ausgangselektrode auf einen Strahl an der Sammelelektrode 20 (wie schematisch in Fig. 3 gezeigt), mit einem Durchmesser von 0,25 mm und die an die MCP, und die Fokussierringe angelegte Vorspannung erhöht die mittlere Energie der Elektronen, welche auf der Diode 34 aufschlagen, auf 10.000 eV. Die Verstärkung des FEB-Ionendetektors kann eingestellt werden durch Ändern der Vorspannung der MCP (d.h., durch Ändern der Spannung zwischen den MCP-Eingangs- und -Ausgangselektroden) und durch Ändern der Gesamtvorspannung zwischen der MCP, den Fokussierringen und der Sammelanode. Für eine MCP-Vorspannung von 1.000 V und einer Gesamtvorspannung von 10.000 V, wie bei diesem Beispiel erläutert, liegt die FEB-Ionendetektorverstärkung in der Größenordnung von 90 Millionen.

Fig. 4A zeigt die gemessene Übertragungskurve (Diodenausgangsstrom als Funktion des Eingangsstroms) und Fig. 4B zeigt die Differentialverstärkung eines Prototyp-FEB-Ionendetektors. Der Detektor wird dabei verwendet, um einen Eingangselektronenstrom zu ermitteln. Die Verstärkung nähert sich einer Million bei einem Eingangsstrom von einem Nanoampère.

Der FEB-Ionendetektor stellt eine Verbesserung gegenüber aktuellen Ionendetektoren, wie etwa Channeltrons und MCP-Stapeln, dadurch dar, daß er die Bandbreite der Einrichtung und den Dynamikbereich aufgrund der Fähigkeit der Pin-Diode verbessert,

relativ hohe Momentanströme zu verarbeiten, während sie trotzdem ein lineares Ansprechen bereitstellt. Der FEB-Detektor besitzt außerdem eine niedrige Kapazität und damit eine raschere Erholungszeit im Vergleich zu Detektoren gemäß dem Stand der Technik.

Der FEB-Detektor besitzt eine längere Nutzungszeit als aktuelle Channeltron- oder MCP-Stapel-Ionendetektoren. Die hohe Verstärkung, mit welcher Channeltrone und MCP-Stapel betrieben werden müssen, vergrößert die Elektronen-Bombardementrate an den Ausgängen der Einrichtungen. Die höhere Bombardementrate beeinträchtigt die Innenseite der Kanäle und führt dazu, daß ihr Emissionsvermögen abnimmt. Diese Form von Beeinträchtigung wird mit dem FEB-Ionendetektor gemäß dieser Erfindung vermieden, weil die MCP bei geringerer Verstärkung betrieben wird.

Der FEB-Detektor besitzt nicht nur dieselben stringenten Anforderungen an das Vakuum wie die MCP-Stapel und Channeltrone. Die hohe Stromverstärkung von MCP-Stapel und Channeltronen erzeugt hohe Elektronendichten innerhalb der Kanäle. Kollision zwischen den Elektronen und beliebigen Gasmolekülen, die in den Kanälen anwesend sind, kann zur Erzeugung positiver Ionen führen. Da die positiven Ionen sich in Richtung auf das Eingangsende der Kanäle unter dem Einfluß der Vorspannung bewegen, schlagen sie auf den Kanalwänden ein und erzeugen "Rausch"-Elektronen. Höhere Vorspannungen erzeugen mehr Ionen und vergrößern den Geräusch-Effekt. Da der FEB-Detektor gemäß dieser Erfindung bei niedrigeren Vorspannungen betrieben werden kann als aktuelle Channeltrone und MCP-Stapel, werden weniger Ionen in den Kanälen bei gegebenen Gasmolekülkonzentrationen erzeugt. Der FEB-Detektor kann deshalb unter weniger stringenten Vakuumbedingungen als aktuelle Detektoren betrie-

ben werden, wobei das Ionen-Rauschen auf einem Minimum gehalten ist.

Das vorstehend erläuterte Beispiel stellt lediglich eine der zahlreichen möglichen Konfigurationen dar und weitere Konfigurationen von FEB-Detektoren liegen im Umfang dieser Erfindung. Gemäß einer alternativen Ausführungsform kann beispielsweise eine Silicium- oder GaAs-Avalanche-Photodiode statt der vorstehend erläuterten Festkörperdiode verwendet werden, um zusätzliche Verstärkung bereitzustellen. Außerdem kann der Detektor mehr als eine MCP in Reihen(gestapelter)-Anordnung verwendet werden, um die Verstärkung des Detektors zu verbessern.

Gemäß einer weiteren alternativen Ausführungsform können die Fokussierringe modifiziert sein und mehr Fokussierringe können hinzugefügt werden, um das Fokussieren für die Anwendung zu optimieren. Die einzige Diode 34 kann ersetzt sein durch eine Gruppierung von Dioden, um Positionsinformation bereitzustellen.

Die Abmessung und Eigenschaften des FEB-Detektors sollten so gewählt sein, daß sie der Anwendung entsprechen. Beispielsweise kann die MCP mit größerem Durchmesser ausgelegt sein, um den Detektoreingangsbereich bzw. die Detektoreingangsfläche zu vergrößern. Die Verbindung zwischen der Diode und dem Vorrichtungsmonteur kann optimiert werden durch Impedanzanpassung der Diode an die koaxiale Übertragungsleitung in einer zum Stand der Technik gehörenden Art und Weise. Impedanzanpassen trägt dazu bei, das Ansprechen des Detektors über den Frequenzdynamikbereich flach zu halten.

Während der FEB-Ionendetektor unter Bezug auf die Ermittlung von Ionen erläutert wurde, kann der FEB-Detektor verwendet werden, um ein beliebiges Partikel zu ermitteln, welches Elektronen erzeugt, welche auf den Kanalwänden einer MCP einschlagen, beispielsweise Röntgenstrahlen, ein Photon oder ein energetisch neutrales Partikel. Obwohl der FEB-Detektor anhand gewöhnlicher MCPs erläutert wurde, können die Wände dieser MCPs auch dotiert oder beschichtet sein, um den Elektronenerzeugungseffekt in zum Stand der Technik gehörender Weise zur Verwendung bei dieser Erfindung zu verbessern.

Eine bevorzugte Ausführungsform einer Hybrid-Photovervielfacherröhre ist in Fig. 5 gezeigt. Elektrische Equipotentiallinien und Elektronenflugbahnen der Hybrid-Photovervielfacherröhre sind im Schema von Fig. 6 gezeigt. Eine Vakuumhülle 110 bzw. ein Gehäuse umschließt einen Vakuumbereich 112 typischerweise mit einem Druck in der Größenordnung von $1,33 \times 10^{-8}$ Pa (10^{-10} Torr). Die Vakuumhülle 110 enthält ein Fenster 114, eine Seitenwand 116, eine Elektrode 118 und eine (Steck-)Verbinderanordnung 120. Die Seitenwand 116 umfaßt typischerweise mehrere Keramikringe. Die Vakuumhülle 110 besitzt typischerweise Kreissymmetrie um eine Mittenachse 122 derart, daß die Seitenwand 116 zylindrisch ist. Die Vakuumhülle 110 kann jedoch andere physikalische Konfigurationen besitzen.

Eine Kathode 130 ist auf der Innenseite des Fensters 114 angeordnet. Die Photokathode 130 besteht bevorzugt aus einem Halbleitermaterial der Gruppe III-V, wie etwa Galliumarsenid, Galliumarsenidphosphid, Indiumphosphid oder Indiumphosphid/Indiumgalliumarsenid. Eine geeignete Galliumarsenidphosphid-Photokathode ist offenbart durch J.P. Edgecumbe et al. in "A GaAsP Photocathode with 40% QE at 515 nm", SPIE, Band 1655,

Electron Tubes and Image Intensifiers, Februar 1992. Eine geeignete Galliumarsenid-Photokathode ist offenbart durch K.A. Costello et al. in "Imaging GaAs Vacuum Photodiode with 40% Quantum Efficiency at 530 nm", SPIE, Band 1243, Electron Image Tubes and Image Intensifiers, 1990. Eine weitere geeignete Photokathode ist offenbart durch K. Costello et al. in "Transferred Electron Photocathode with greater than 5% Quantum Efficiency beyond one Micron", SPIE, Band 1449, Electron Tubes and Image Intensifiers II, 1991. Typischerweise ist ein Wafer mit epitaxial aufgewachsenen Schichten, geeignet für Photokathodenmaterial, an das Fenster 114 geklebt, und das Wafersubstrat ist im Falle von GaAs- oder GaAs-P-Photokathoden weggeätzt. Im Fall einer übertragenen Elektronenphotokathode kann das Substrat in Takt gelassen oder entfernt werden. Die Photokathode 130 emittiert Elektronen ansprechend auf einfallendes Licht, welches durch das Fenster 114 empfangen wird.

Die durch die Photokathode 130 emittierten Elektronen werden auf die Photodiode 132 durch Elektroden 134 und 136 fokussiert, die in der Vakuumhülle 110 dicht eingeschlossen sind. Die Elektroden 134 und 136 besitzen zentrale Durchbrüche 138 und 140 für den Hindurchtritt der Elektronen zu der Photodiode 132. Die Platzierung und Abmessungen der Elektroden 134 und 136 sind so gewählt, daß die durch die Photokathode auf die Photodiode 132 emittierten Elektronen fokussiert werden. Zusätzliche Fokussierelektroden können, falls erwünscht, verwendet werden.

Die Photokathode 130 wird typischerweise vorgespannt auf etwa -10 kV. Mit dieser Photokathodenspannung ist die Elektrode 134 typischerweise vorgespannt auf -9.878 V, und die Elektrode 136 ist vorgespannt auf -9.700 V. Die Elektrode 118 ist elektrisch

mit der Photodiode 132 verbunden und auf Masse gelegt. Die Vorspannungen werden durch geeignete (nicht gezeigte) Spannungsquellen zugeführt.

Bei der Photodiode 132 handelt es sich bevorzugt um eine Avalanche-Photodiode und sie ist auf der Achse 122 angebracht. Die Photodiode 132 ist gewählt, um eine Elektronenvervielfachung zu erzeugen, wenn sie durch energetische Elektronen von der Photokathode 130 getroffen wird. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform handelt es sich bei der Photodiode 132 um eine GaAs/AlGaAs-Avalanche-Photodiode. Weitere geeignete Photodioden umfassen PIN-Photodioden, wie in Fig. 2 gezeigt und vorstehend in Verbindung mit dem FEB-Iondendetektor erläutert.

Wie vorstehend angeführt, können elektrische Ladungen auf der Innenseite 142 der Seitenwand 116 aufgebaut werden. Die Seitenwand 116 kann beispielsweise aus einem Keramikmaterial mit einer Dicke in der Größenordnung von etwa 0,165 cm (0,065 Inch) bestehen. Wie in Fig. 6 gezeigt, werden die von der Photokathode 130 (ausgehend) emittierten Elektronen durch die Elektroden 134 und 136 entlang Flugbahnen 144, 146 usw. fokussiert, welche auf der Photodiode 132 enden bzw. auftreffen. Equipotentiallinien 148, 150 usw. werden durch die Elektrodenkonfiguration erzeugt. Wenn elektrische Ladung auf der Innenseite 142 sich aufbaut, kann die Feldkonfiguration und können damit die Elektronenflugbahnen 144, 146 derart beeinträchtigt werden, daß die Elektronen nicht mehr auf die Photodiode 132 fokussiert sind.

Um dieses Problem zu überwinden, wird ein Leiter auf oder benachbart zu der Seitenwand 116 der Vakuumhülle 110 angeordnet. Bei der Ausführungsform gemäß Fig. 5 umfaßt der Leiter Leiter

152 und 154 auf einer Außenseite der Seitenwand 116. Der Leiter 152 ist mit der Photokathode 130 elektrisch verbunden, und der Leiter 154 ist mit der Elektrode 134 elektrisch verbunden. Ein Spalt 156 ist vorgesehen zwischen den Leitern 152 und 154, um zu verhindern, daß die Photokathode 130 zu der Elektrode 134 kurzgeschlossen wird. Bei dem vorstehend angeführten Beispiel kann der Spalt 156 relativ klein sein, da die Spannungsdifferenz zwischen der Elektrode 134 und der Photokathode 130 in der Größenordnung von 100 V liegt.

Es wird angenommen, daß die Wirkung der Leiter 152 und 154 wie folgt ist. Die Ladungen auf der Innenseite 142 der Seitenwand 116, von denen angenommen wird, daß es sich um positive elektrische Ladungen handelt, werden durch elektrische Ladungen gleicher Höhe und entgegengesetzter Polarität auf den Leitern 152 und 154 kompensiert. Dies verursacht elektrische Felder, da die Ladungen auf der Innenseite 142 auf die Bereiche zwischen den Innen- und Außenseiten der Seitenwand 116 beschränkt werden müssen. Die Ladungen auf den Innen- und Außenseiten der Seitenwand 116 bilden effektiv einen Kondensator, und minimale elektrische Störfelder erstrecken sich von diesen Ladungen in den Vakuumbereich 112 zwischen der Photokathode 130 und der Photodiode 132. Infolge hiervon beeinträchtigen die elektrischen Ladungen auf der Innenseite 142 die Elektronenflugbahnen 144, 146 usw. nicht merklich, welche durch die Elektronen zwischen der Photokathode 130 und der Photodiode 132 verfolgt werden.

Die Leiter 152 und 154 können in herkömmlicher Weise, beispielsweise als Metallfolie oder Metallbeschichtungen, auf der Außenseite der Seitenwand 116 ausgeführt sein. Sowohl die Metallfolie wie die (elektrisch) leitenden Beschichtungen auf

der Außenseite der Photovervielfacherröhre haben sich als zu einem stabilen Röhrenbetrieb führend herausgestellt. Ein Vorteil einer Beschichtung auf einer Außenseite besteht darin, daß Luftleerräume zwischen der Seitenwand 116 und dem Leiter beseitigt werden. Diese Leerräume können eine Anisotropie der Elektronenoptik in der Photovervielfacherröhre hervorrufen. Eine bevorzugte Ausführungsform sieht die Verwendung eines metallischen Anstrichs, wie etwa Silberanstrich, zum Abdecken der Außenseite der Seitenwand 116 vor. Der Spalt 156 zwischen den Leitern 152 und 154 muß ausreichend breit sein, um den Spannungen widerstehen zu können, die an die jeweiligen Elektroden angelegt werden. Wie am besten aus Fig. 6 hervorgeht, ist der Spalt 156 zwischen den Leitern 152 und 154 von einer direkten Sicht auf die Photodiode 132 durch die Elektrode 134 abgeschirmt bzw. abgeschaltet, um die Möglichkeit zu minimieren, daß sich Ladung auf der Seitenwand 116 im Bereich des Spalts 156 aufbaut.

Es wird bemerkt, daß ein Leiter nicht an die Außenseite der Seitenwand 116 in einem Bereich 158 zwischen der Elektrode 136 und der Elektrode 118 angelegt wird. Dieser Teil der Seitenwand 116 ist bevorzugt nicht mit einer metallischen Beschichtung aus mehreren Gründen versehen. Der größte Teil der 10 kV, die an die Photovervielfacherröhre angelegt sind, liegen zwischen den Elektroden 136 und 118 an. Ein relativ großer isolierender Spalt ist deshalb erforderlich. Es wurde herausgefunden, daß die von der Photodiode 132 gestreuten Elektronenflugbahnen in Richtung auf das gegenüberliegende Ende der Röhre benachbart zu der Photokathode 130 folgen. In den Bereichen in der Nähe der Photodiode 132 werden die Elektronen auf relativ hohe Geschwindigkeiten letztendlich beschleunigt, und die

elektrischen Ladungen auf der Seitenwand 116 haben eine geringere Auswirkung auf die Elektronenflugbahnen.

Als Alternative können Leiter entsprechend den Leitern 152 und 154 auf der Innenseite 142 der Seitenwand 116 angeordnet sein. Dies ist deshalb der Fall, weil ermittelt wurde, daß ein gutes Fokussieren der Elektronenflugbahnen 144, 146 usw. auf die Photodiode möglich ist, und daß dieses unter Verwendung der Leiter 152 und 154 geringfügig verbessert werden kann. In diesem Fall werden elektrische Ladungen, die anderweitig auf der isolierenden Oberfläche 42 aufgebaut werden, durch die Leiter auf dieser abgeleitet, wodurch der Aufbau von Ladung verhindert wird. Dieser Ansatz ist wirksam zum Verhindern eines Ladungsaufbaus, jedoch weniger erwünscht als das Anordnen der Leiter 152 und 154 auf der Außenseite der Seitenwand 116, weil Leiter in der Vakuumhülle 110 ausgasen und die Lebensdauer der Photovervielfacherröhre verringern können.

Die (Steck-)Verbinderanordnung 120 umfaßt einen zentralen Leiter 160, der in einem Keramikisolator 162 angebracht ist. Der Keramikisolator 162 ist durch einen äußeren Leiter 164 getragen. Der Keramikisolator 162 ist an den zentralen Leiter 160 und an den äußeren Leiter 164 gelötet. Der äußere Leiter 164 ist an die Elektrode 118 geschweißt, um eine vakuumdichte Anordnung zu bilden. Die Photodiode 132 ist auf dem Ende des zentralen Leiters 160 angebracht, welches sich in den Vakuumbereich 112 erstreckt, um den zentralen Leiter 160 im wesentlichen abzudecken. Der Keramikisolator 162 umfaßt eine Metallisierung 166, wie in Fig. 6 gezeigt, welche mit der Elektrode 118 elektrisch verbunden ist, und welche den zentralen Leiter 116 umgibt, jedoch nicht kontaktiert. Ein dünner Draht 168 ist zwischen die Metallisierung 166 und das obere Kontaktfeld der

Photodiode 162 in Verbindung gebracht. Die Verbinderanordnung 132 umfaßt außerdem einen herkömmlichen SMA-Koaxial(steck)-Verbinder 170, der am zentralen Leiter 160 und dem äußeren Leiter 164 durch eine Sicherungsmutter 172 befestigt ist.

Die Verbinderanordnung 120 hat mehrere Vorteile beim Betrieb der Hybrid-Photovervielfacherröhre. Der Verbinder dient als Teil der Vakuumhülle 110 und beeinflusst dadurch die Form der elektrischen Felder in der Röhre. Die Innenseite des Verbinders ist dem offenen Volumen der Röhre derart ausgesetzt, daß die Fläche während der Röhrenverarbeitung mittels Elektronen geschrubbt wird, was zu einer reineren Röhre führt. Der Verbinder trägt die Photodiode 132 auf dem zentralen Leiter 160, der vollständig durch die Photodiode 132 abgedeckt ist. Die an die Photodiode 132 angelegte Vorspannung beeinflusst die elektrischen Felder nicht, welche die Elektronen auf die Photodiode fokussieren. Die bevorzugte Photodiode 132 besitzt eine relativ niedrige Betriebsspannung, was die Verwendung eines SMA-Ausgangsverbinders gemäß Industriestandard erlaubt. Der Verbinder ist an 50 Ω Impedanz angepaßt, um ein flaches Frequenzansprechen über 1 GHz hinaus zu ermöglichen.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform besitzt die Photokathode 130 einen Durchmesser von 24,5 mm und das Fenster 114 ist aus Corning-7056-Glas hergestellt. Die Vakuumhülle 110 besitzt einen Durchmesser von 4,06 cm (1,6") und eine Länge von 5,08 cm (2,0"). Die Quantenausbeute und die Empfindlichkeit für eine Galliumarsenidphosphid-Photokathode sind, wie in dem vorstehend genannten Artikel von J.P. Edgecumbe et al. erläutert, als Funktion der Wellenlänge in Fig. 7 aufgetragen. Die Quantenausbeute und die Empfindlichkeit für eine Galliumarsenid-Photokathode sind, wie in dem vorstehenden Artikel von

K.A. Costello et al. erläutert, als Funktion der Wellenlänge in Fig. 8 aufgetragen. In beiden Fällen wird erwartet, daß die Verstärkung größer als 20.000 und die Anstiegszeit kleiner als 0,5 Nanosekunden ist. Die Elektronen-Bombardementverstärkung ist als Funktion der Photokathodenvorspannung relativ zu der Anode in Fig. 9 aufgetragen.

Die Verwendung eines Leiters benachbart zu oder auf der Vakuumhülle zur Begrenzung des Effekts von elektrischen Ladungen auf der Hüllwand auf die Elektronenflugbahnen ist in Verbindung mit einer Hybrid-Photovervielfacherröhre vorstehend erläutert. Es wird erwartet, daß diese Technik, d.h., das Passivieren bzw. Ausgleichen der Ladung, die sich auf einem Leiter auf der Außenseite der Vakuumhülle aufgebaut hat, in jeglicher Photovervielfacherröhre verwendet werden kann, und allgemeiner in jeder Vakuumröhre, wie eine Vakuumhülle, eine Quelle für geladene Partikel und eine Optik zum Steuern der Flugbahnen der geladenen Partikel in der Vakuumhülle umfaßt. Der Leiter kann außerdem auf dem vorstehend erläuterten FEB-Ionendetektor verwendet werden. Durch Begrenzen der elektrischen Felder, die aus den Ladungen an dem Bereich in der Wand der Vakuumhülle resultieren, wird die Wirkung der Ladungen auf die Flugbahnen der geladenen Partikel minimiert. Wie vorstehend angeführt, kann der Leiter auf der Vakuumhüllwand oder benachbart zu dieser in einem beliebigen Bereich angeordnet werden, wo es erwünscht ist, die Effekte von Ladungen auf die Innenseite der Vakuumhülle zu begrenzen.

PATENTANSPRÜCHE

1. Photovervielfacherröhre, aufweisend:

Eine Vakuumhülle (110),

eine Quelle für geladene Partikel in der Vakuumhülle (110), aufweisend eine Photokathode (130) zum Emittieren von Elektronen, ansprechend auf einfallende Photonen, einen Detektor zum Sammeln und Vervielfältigen der Elektronen und zum Bereitstellen eines für die einfallenden Photonen repräsentativen Ausgangssignals, wobei eine Potentialdifferenz im Gebrauch zwischen der Photokathode (130) und dem Detektor derart aufrechterhalten wird, daß die Elektronen in Richtung auf den Detektor beschleunigt werden, und

eine Optik mit einer oder mehreren Elektroden (134, 136) zum Fokussieren der Elektronen auf den Detektor, gekennzeichnet durch:

Leitermittel, aufweisend erste (152) und zweite (154) Leiter, die voneinander isoliert und im wesentlichen in nicht-überlappender Beziehung sequentiell entlang dem Pfad der Flugbahnen der geladenen Partikel angeordnet sind, wobei der erste Leiter (152) elektrisch mit der Photokathode (130) verbunden ist, und wobei der zweite Leiter (154) elektrisch mit einer der Elektroden (134) verbunden ist.

2. Röhre nach Anspruch 1, wobei die Quelle für geladene Partikel eine Elektronenquelle 130 umfaßt.
3. Röhre nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Leitermittel auf einer Außenseite der Vakuumhülle angeordnet sind.

4. Röhre nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Leitermittel eine Beschichtung auf der Außenseite aufweisen.
5. Röhre nach Anspruch 4, wobei die leitfähige Leitung Silber umfaßt.
6. Röhre nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei ein Spalt (156) zwischen den ersten (152) und zweiten (154) Leitern auf einem Teil der Vakuumhülle (110) angeordnet ist, der durch die Elektronen (134, 136) von einer direkten Sicht auf den Detektor (132) versperrt ist.
7. Röhre nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Vakuumhülle ein Fenster (114) umfaßt und die Photokathode (130) auf einer Innenseite des Fensters angeordnet ist.
8. Röhre nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Photokathode (130) Halbleitermaterial von der Gruppe III-V umfaßt.
9. Röhre nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die Photokathode (130) gewählt ist aus der Gruppe, die besteht aus GaAs, GaAsp, InP und InP/InGaAs.
10. Röhre nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Elektroden (134, 136) erste und zweite voneinander beabstandete Elektroden mit Durchbrüchen (136) zum Durchlassen der Elektronen aufweisen.
11. Röhre nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei der Detektor eine Avalanche-Photodiode (132) umfaßt.

12. Röhre nach Anspruch 11, wobei die Vakuumhülle (110) eine koaxiale Durchführung (160) aufweist, die mit der Photodiode (132) verbunden ist, wobei die koaxiale Durchführung (160) das Ausgangssignal aus der Vakuumhülle (110) auskoppelt.
13. Röhre nach Anspruch 12, wobei die koaxiale Durchführung einen zentralen Leiter (160) umfaßt, und wobei die Photodiode (132) auf dem zentralen Leiter (160) angeordnet ist.
14. Röhre nach Anspruch 13, wobei die Photodiode (132) ein Ende des zentralen Leiters (160) abdeckt.

0602983

07.08.00

1/7

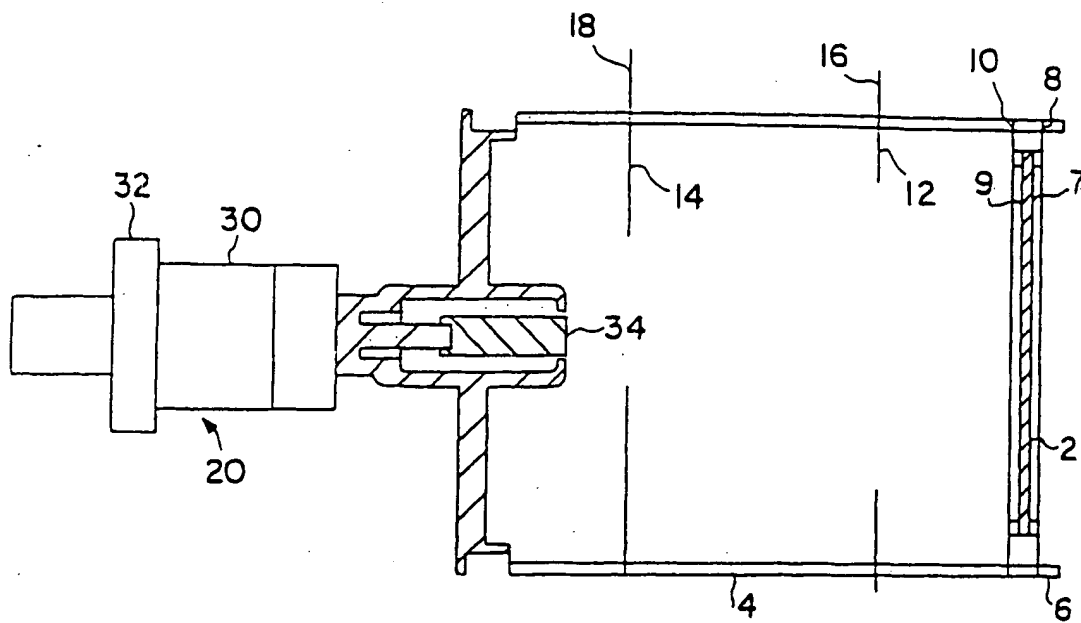


FIG. 1

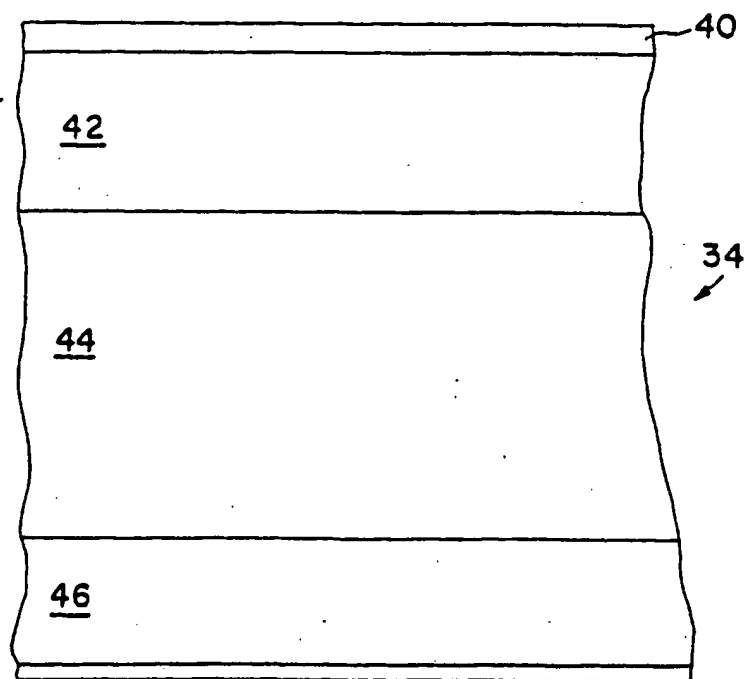


FIG. 2

07-08-00

2/7

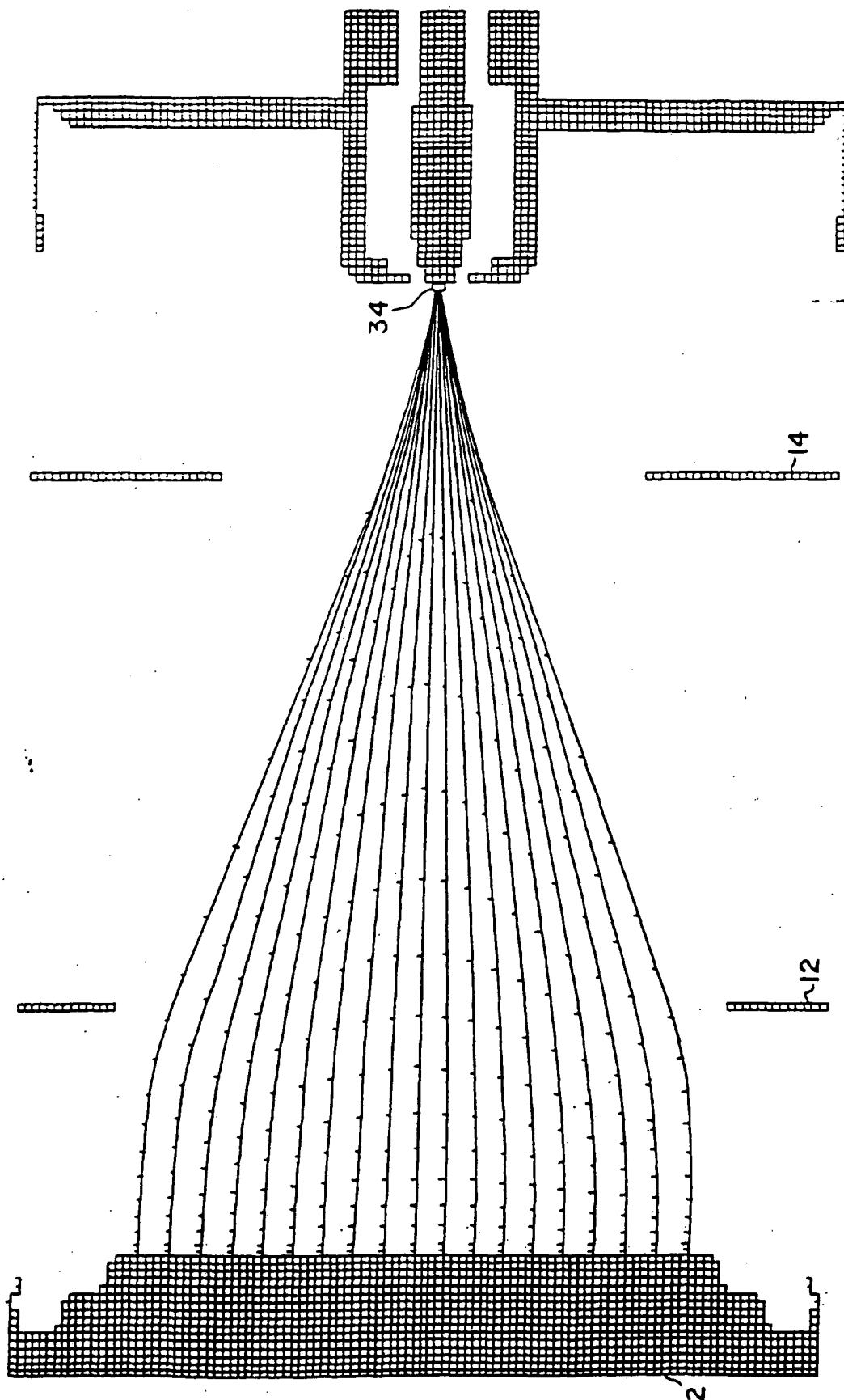


FIG.3

07.08.00

3/7

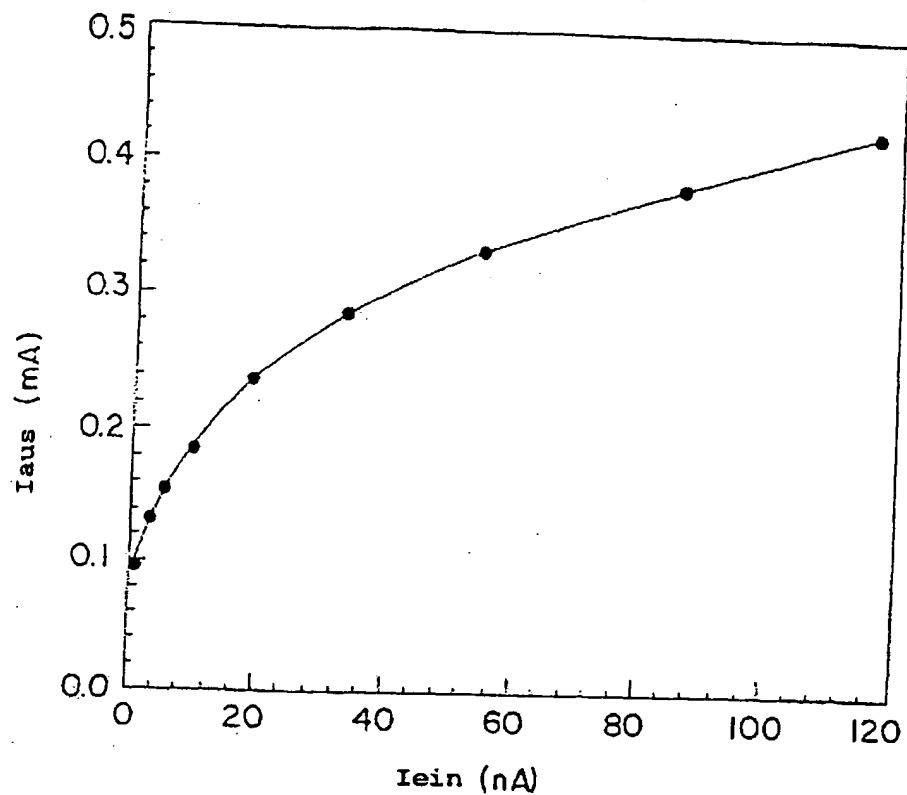


FIG.4A

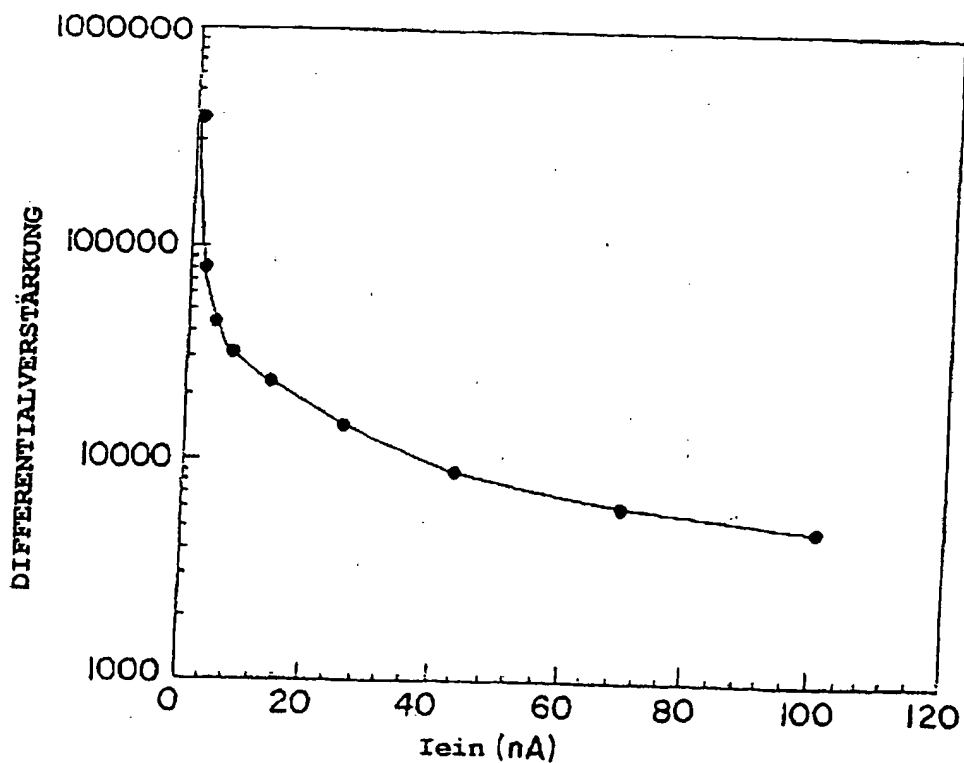


FIG.4B

07.05.00

4/7

476

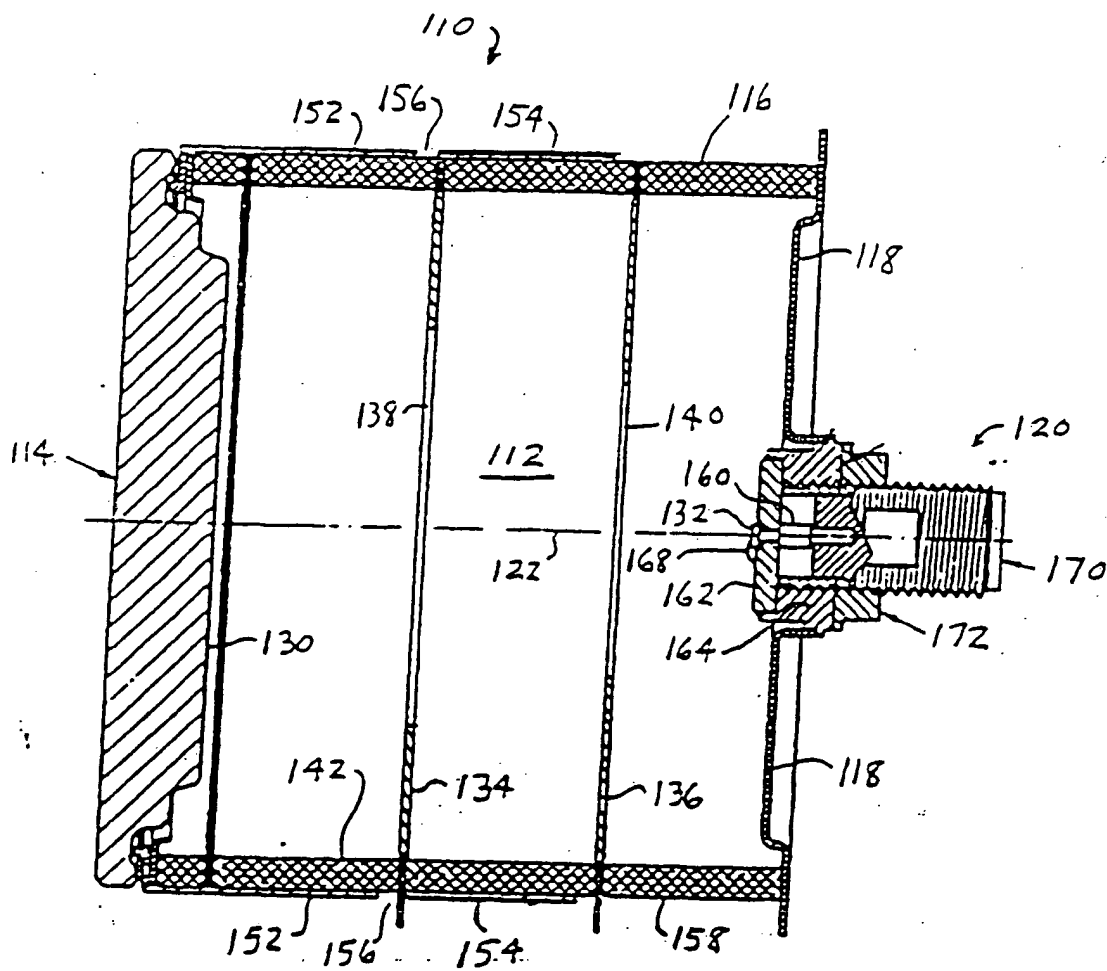


FIG. 5

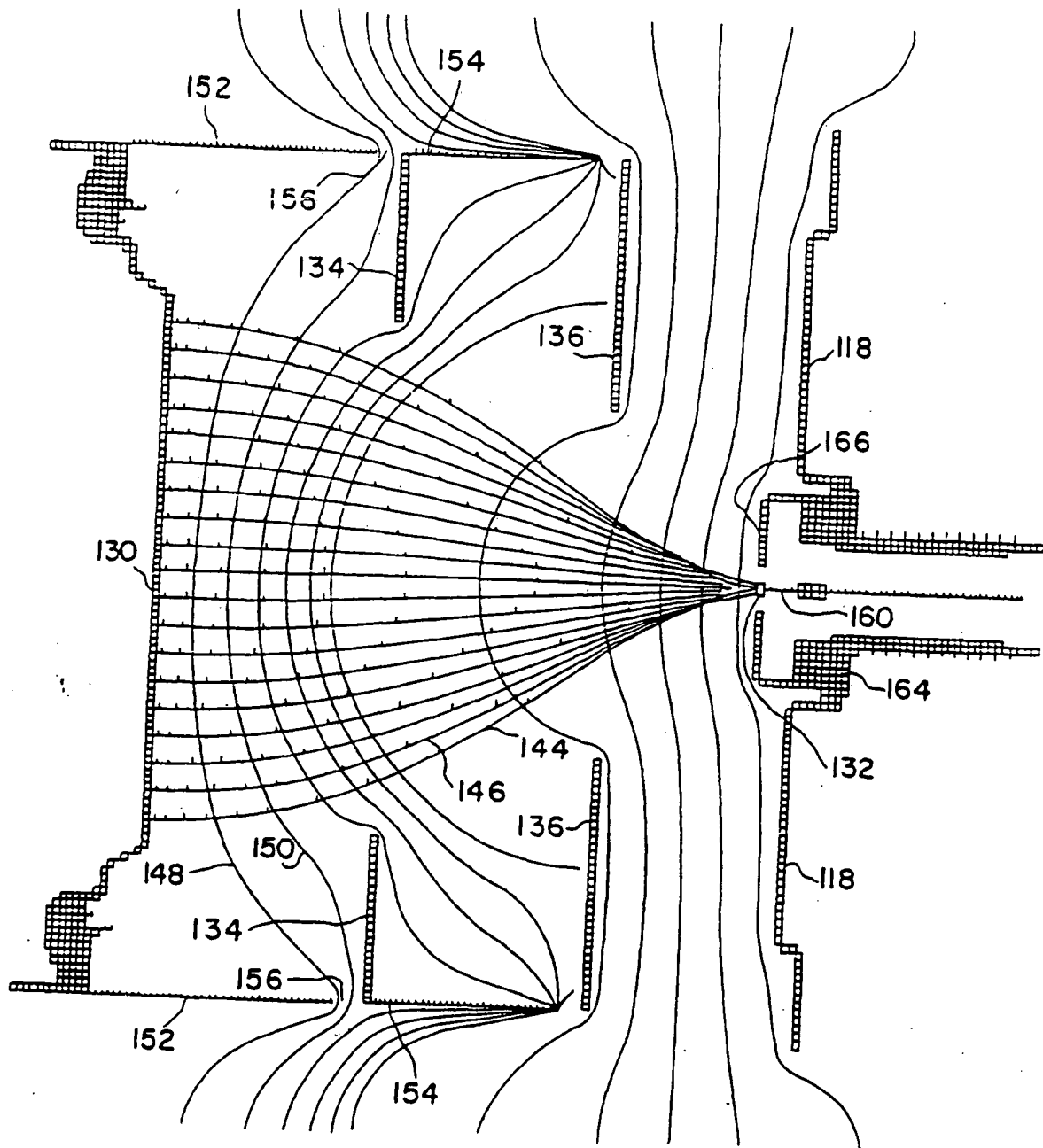


FIG. 6

07.08.00

6/7

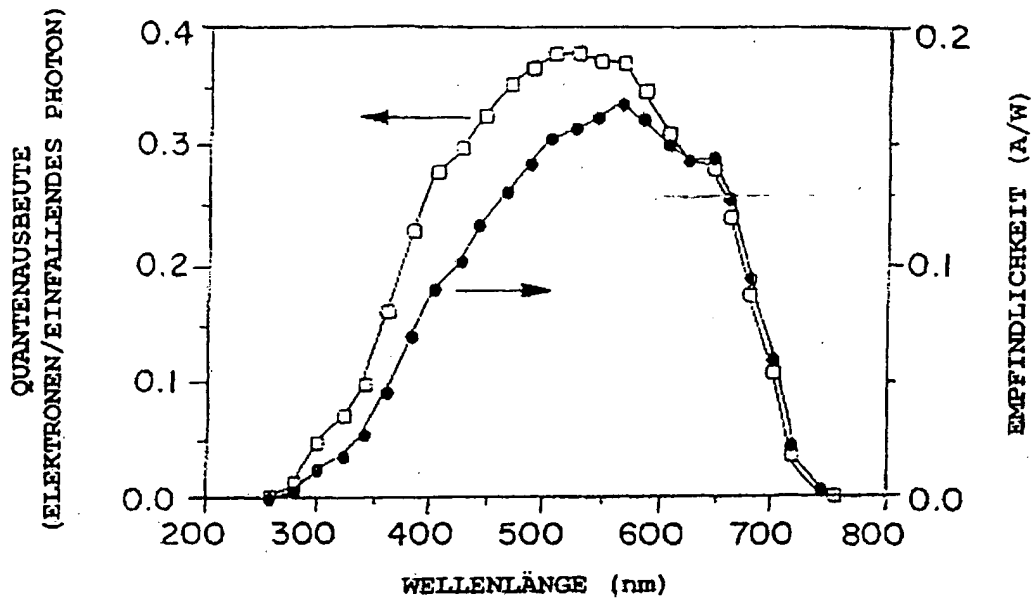


FIG.7

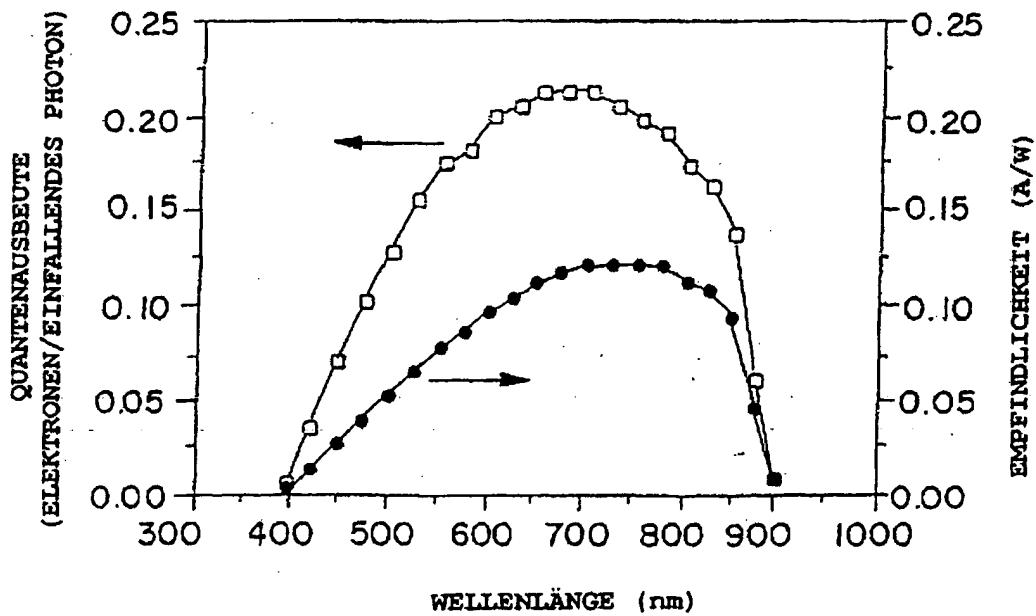


FIG.8

07.06.00

7/7

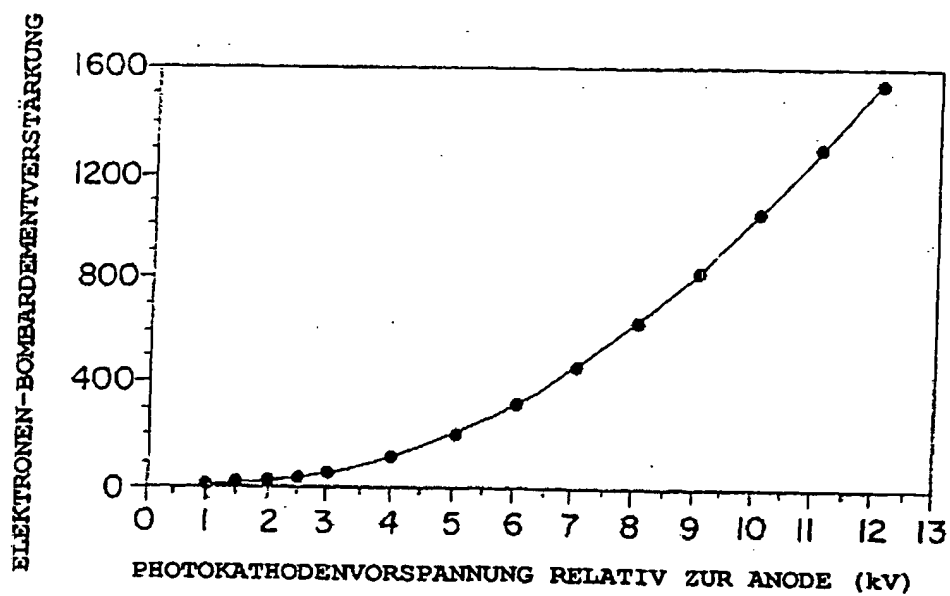


FIG.9